

УДК [594.38:575.2](28)(477.41)

<sup>1</sup>Д.І. Гудков, д.б.н., с.н.с.<sup>2</sup>О.В. Дзюбенко, асп.<sup>3</sup>О.М. Проценко, магістр<sup>4</sup>Л.С. Чепіга, студ.

## МОЛЮСКИ В РАДІОЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ПРІСНОВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

<sup>1,2</sup>Інститут гідробіології НАН України<sup>3,4</sup>Національний авіаційний університет<sup>1</sup>E-mail: digudkov@svitonline.com<sup>2</sup>E-mail: radioeco@i.com.ua<sup>3</sup>E-mail: mary\_mishon@bigmir.net<sup>4</sup>E-mail: LyudmilaCh@i.ua

*Проаналізовано видоспецифічність і динаміку концентрування  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  та деяких трансуранових елементів у двостулкових і черевоногих прісноводних молюсків Чорнобильської зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення в період 1998–2010 рр. Наведено результати оцінки дозових навантажень, частоти хромосомних аберацій та аналізу складу гемолімфи молюсків. Потужність поглиненої дози опромінення реєстровано в діапазоні 0,3–85,0 мкГр/год. У замкнутих водоймах відмічено підвищену частоту хромосомних аберацій у тканинах ембріонів (до 27 %) та зміну гематологічних показників у дорослих особин молюсків.*

**Ключові слова:** гематологічні показники, дозові навантаження, прісноводні молюски, радіонуклідне забруднення, хромосомні аберації, Чорнобильська зона відчуження.

### Постановка проблеми

Водні молюски є широко використовуваними об'єктами радіоекологічних і радіобіологічних досліджень акваторій, що зазнають впливу підприємств ядерного паливного циклу.

Завдяки здатності накопичувати майже всі радіонукліди, що присутні в оточуючому їх середовищі, та високій біомасі молюски відіграють важливу роль у процесах акумуляції та біоседиментації радіоактивних речовин у прісноводних екосистемах.

Це дозволяє розглядати цих безхребетних, з одного боку, як види-індикатори забруднення навколишнього середовища радіонуклідами, а з іншого – як організми, що беруть активну участь у процесах перерозподілу радіоактивних речовин у гідробіоценозах.

Водні екосистеми атомної електростанції Чорнобильській зони відчуження і через 25 років характеризуються високими рівнями

радіонуклідного забруднення зі складною динамікою фізико-хімічних форм, що впливають на швидкість міграції, біологічну доступність та інтенсивність накопичення радіонуклідів компонентами екосистем [1–6].

Збільшення концентрування радіоактивних речовин біотою може зумовлювати критичні дозові навантаження на організми, яким притаманні високі коефіцієнти накопичення радіонуклідів і які населяють екологічні зони з підвищеними рівнями зовнішнього опромінювання.

Однією з найважливіших радіоекологічних проблем, пов'язаних із наслідками аварії на ЧАЕС, залишається оцінка ушкоджень біосистем у результаті інтенсивного радіонуклідного забруднення і зумовленого цим радіаційного опромінювання, яке в зоні відчуження набуло хронічного характеру.

### Метою роботи є:

- аналіз видоспецифічності і динаміки концентрування  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  прісноводними молюсками;
- оцінка дозових навантажень за рахунок зовнішніх джерел опромінювання і радіонуклідів, інкорпорованих у тканинах;
- аналіз частоти хромосомних аберацій у період ембріонального розвитку, складу гемолімфи дорослих особин молюсків у водоймах зони відчуження.

### Об'єкти і методи досліджень

Основні дослідження виконували в період 1998–2010 рр. в оз. Азбучин, Янівському (Прип'ятському) затоні, водоймі-охолоджувачі (ВО) ЧАЕС, озерах Красненської заплави р. Прип'яті – Глибоке і Далеке-1, р. Уж (біля с. Черевач) і р. Прип'ять (біля Чорнобиля).

Як контрольні водойми для порівняльних цитогенетичних і гематологічних досліджень використовували озера з фоновим рівнем радіонуклідного забруднення, розташованих в Києві та його околицях – Вирлиця, Голосіївське, Опечінь, Підбірна.

Аналіз вмісту радіонуклідів у молюсках проводили з використанням таких видів:

- ставковик звичайний (*Lymnaea stagnalis* L.);
- ставковик болотний (*Stagnicola palustris* L.);
- ставковик яйцеподібний (*Radix ovata* L.);
- котушка рогова (*Planorbis corneus* L.);
- живородка річкова (*Viviparus viviparus* L.);
- дрейсена (*Dreissena polymorpha* Pall. і *D. bugensis* Andr.);
- перлівниця звичайна (*Unio pictorum* L.);
- перлівниця клиноподібна (*Unio tumidus* Phil.);
- жабурниця звичайна (*Anodonta cygnea* L.).

Вимірювання питомої активності радіонуклідів у молюсках виконували без відділення м'яких тканин від черепашки.

Результати вимірювань наведено в бекерелях на кілограм (Бк/кг) маси при природній вологості.

Здатність молюсків акумулювати радіонукліди визначали як коефіцієнт концентрування  $K_k$ , розраховували відношенням питомої активності радіонуклідів у молюсках до середньорічної питомої активності води місць проживання і виражали в літрах на кілограм (л/кг).

### Видоспецифічність і рівні накопичення радіонуклідів

Серед полігонних водойм зони відчуження найбільші середні показники питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  протягом періоду досліджень реєстрували в молюсках оз. Глибоке. Далі за зменшенням вмісту радіонуклідів знаходилися молюски оз. Азбучин, оз. Далеке-1, Янівського затону і ВО ЧАЕС.

Вміст  $^{137}\text{Cs}$  в молюсках Янівського затону, не зважаючи на порівняно високі значення питомої активності  $^{90}\text{Sr}$ , був істотно менший порівняно з молюсками ВО ЧАЕС.

Найнижчим вмістом радіонуклідів характеризувалися молюски з проточних водних об'єктів – р. Уж і р. Прип'ять (рис. 1).

Кількісні параметри питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  у прісноводних молюсках зони відчуження досить добре відбивають рівні

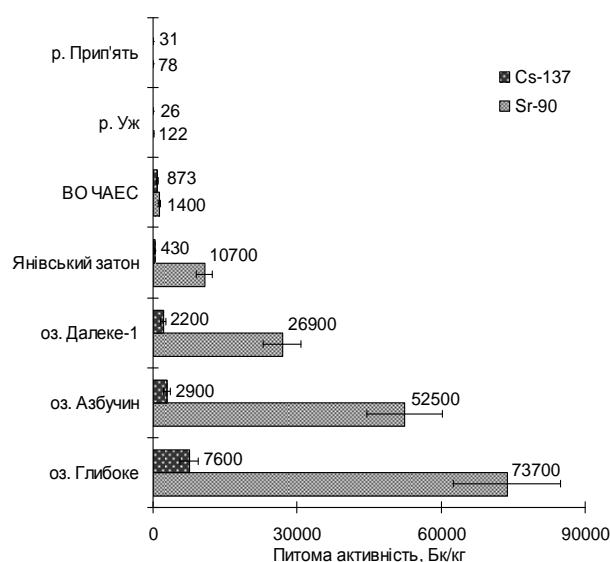


Рис. 1. Середні значення питомої активності радіонуклідів у прісноводних молюсках зони відчуження в період 1998–2009 рр.

вмісту радіонуклідів в основних компонентах досліджуваних водних екосистем і, в першу чергу, у воді місць проживання безхребетних.

У результаті аналізу співвідношення питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  в молюсках і у воді досліджуваних водойм та зіставлення цих показників із катіонним складом води відмічено найменше відношення питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  до  $^{90}\text{Sr}$  в молюсках ВО ЧАЕС порівняно з рештою полігонних водойм. Це можна пояснити аномально високим серед водойм зони відчуження відношенням питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  до  $^{137}\text{Cs}$  у воді ВО ЧАЕС, що відбивається на інтенсивності накопичення радіонуклідів молюсками. Але основною причиною підвищеного вмісту  $^{137}\text{Cs}$  в тканинах молюсків ВО порівняно з молюсками Янівського затону, вміст  $^{90}\text{Sr}$  в яких у вісім разів вищий, є низький вміст у воді ВО катіонів  $\text{Na}^+$  та  $\text{K}^+$ , що визначає високе співвідношення  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+ + \text{K}^+$  і створює сприятливі умови для акумуляції  $^{137}\text{Cs}$ .

Вплив катіонного складу води на співвідношення питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  у молюсків також добре спостерігається і на прикладі водойм лівого бережжя (оз. Глибоке і оз. Далеке-1) і правобережжя р. Прип'яті (оз. Азбучин і Янівський затон), що характеризуються різним гідрохімічним і гідрологічним режимами.

Не зважаючи на порівняно високе відношення  $^{90}\text{Sr} / ^{137}\text{Cs}$  у воді озер лівобережної заплави, співвідношення цих радіонуклідів у молюсках нижче, ніж у водоймах правобережжя.

Головною причиною такого співвідношення радіонуклідів є низьке відношення  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+ + \text{K}^+$  у воді Янівського затону і оз. Азбучин, що визначає невисоку інтенсивність концентрування  $^{137}\text{Cs}$  молюсками.

На прикладі ставковика звичайного, як найбільш поширеного і доступного для відбору виду в досліджуваних водоймах,

розглянуто особливості концентрування  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$ .

Аналіз розрахунків показав, що середні значення  $K_k ^{90}\text{Sr}$  знаходилися в діапазоні 360–550 л/кг, що визначає різницю між максимальними і мінімальними значеннями в 1,5 рази і дозволяє робити висновок про неістотну відмінність  $K_k ^{90}\text{Sr}$  у ставковика звичайного у водоймах зони відчуження (рис. 2, а).

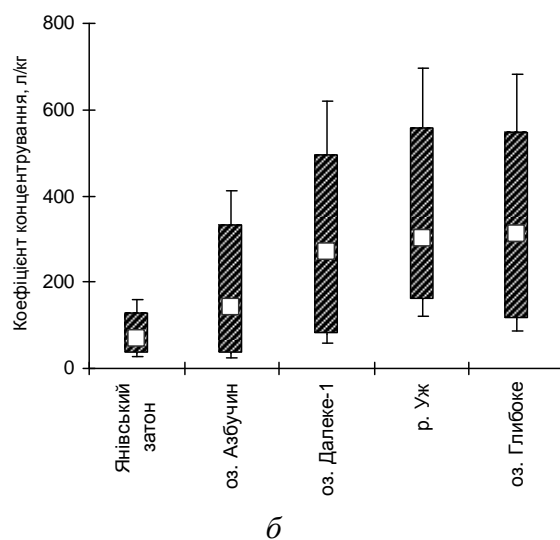
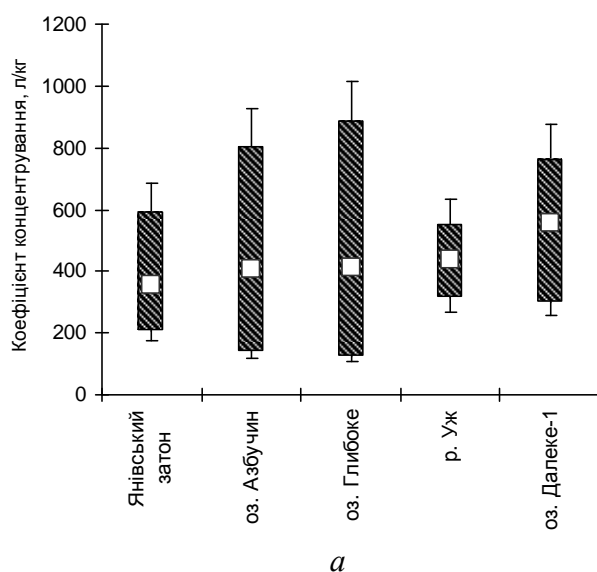


Рис. 2. Діапазон значення  $K_k ^{90}\text{Sr}$  ставковика звичайного у водоймах зони відчуження:  
а – середні значення  $K_k ^{90}\text{Sr}$ ;  
б – середні значення  $K_k ^{137}\text{Cs}$

Значення середніх величин  $K_k$  для  $^{137}\text{Cs}$  було в межах 70–300 л/кг, що визначало різницю між максимальними і мінімальними значеннями більш ніж у чотири рази (рис. 2, б).

Мінімальні середні значення відмічено в Янівському затоні і оз. Азбучин, катіонний склад води в яких відрізняється порівняно високим вмістом катіонів  $\text{Na}^+$  та  $\text{K}^+$ , що визначає низьку інтенсивність концентрування молюсками  $^{137}\text{Cs}$ .

Мінімальні значення  $^{238}\text{Pu}$  та  $^{239+240}\text{Pu}$  в тканинах молюсків відмічені для ставковика звичайного відповідно 0,1 і 0,2 Бк/кг в оз. Далеке-1 та 2,7 і 6,4 Бк/кг в оз. Глибоке.

Дещо вищий вміст відмічений для ставковика болотного з оз. Глибоке – відповідно 14,0 і 36,0 Бк/кг.

Максимальні активності серед червоногих молюсків водойм Красненської заплави зареєстровані для катушки рогової відповідно 0,9 і 2,1 Бк/кг в оз. Далеке-1 та 24,7 і 53,0 Бк/кг в оз. Глибоке.

Дрейсена з ВО ЧАЕС характеризувалася величинами питомої активності  $^{238}\text{Pu}$  та  $^{239+240}\text{Pu}$  відповідно 2,8 і 6,2 Бк/кг.

Вміст  $^{241}\text{Am}$  був мінімальним у тканинах ставковика звичайного і реєструвався в діапазоні 5–30 (15) Бк/кг в оз. Далеке-1 та 6–51 (27) Бк/кг в оз. Глибоке.

Для ставковика болотного з оз. Глибоке відмічені концентрації до 75 Бк/кг.

Максимальні значення зареєстровані для катушки рогової – 18–29 (24) Бк/кг в оз. Далеке-1 та 80–310 (170) Бк/кг в оз. Глибоке.

Вміст  $^{241}\text{Am}$  в тканинах дрейсени з ВО ЧАЕС становив близько 8 Бк/кг.

Аналіз видоспецифічності накопичення  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  показав, що двостулкові молюски, які є облігатними фільтраторами та мають масивну черепашку, є більш ефективнішими концентраторами радіонуклідів порівняно з червоногими молюсками.

Так, майже в усіх досліджуваних водоймах найбільші  $K_k$  радіонуклідів відмічені в перлівниці звичайної.

Відмінності в накопиченні  $^{90}\text{Sr}$ , що концентрується переважно в скелетних утвореннях, зумовлені в першу чергу питомим внеском черепашок у загальну вагу молюска.

Найбільші значення  $K_k$   $^{90}\text{Sr}$  відмічені в перлівниці звичайної і дрейсени.

Концентрування  $^{137}\text{Cs}$  із більшою ефективністю відбувається у двостулкових молюсків, а у різних видів червоногих майже на одному рівні.

Особливості морфологічної будови і функціонування червоногих і двостулкових молюсків зумовлюють певні відмінності щодо будови тіла та співвідношення специфічних тканин і органів, які концентрують радіонукліди. Це визначає різні величини  $K_k$  досліджуваних радіонуклідів для представників різних груп і дозволяє на прикладі ставковика звичайного з оз. Глибоке і дрейсени з ВО ЧАЕС розташувати середні значення  $K_k$  у ряді зменшення таким чином:

– ставковик звичайний:  
 $^{241}\text{Am}$  (4120) >  $^{238}\text{Pu}$  (590) >  $^{239+240}\text{Pu}$  (450) >  $^{90}\text{Sr}$  (412) >  $^{137}\text{Cs}$  (310);

– дрейсена:  
 $^{241}\text{Am}$  (29250) >  $^{238}\text{Pu}$  (9200) >  $^{239+240}\text{Pu}$  (8730) >  $^{90}\text{Sr}$  (1100) >  $^{137}\text{Cs}$  (350).

### Дозові навантаження і радіаційні ефекти

Потужність поглиненої дози для дорослих червоногих молюсків за рахунок зовнішніх і внутрішніх джерел опромінювання за період досліджень реєстрували в таких діапазонах:

оз. Глибоке – 30–85 мкГр/год;  
 оз. Азбучин – 18–27 мкГр/год;  
 оз. Далеке-1 – 12–20 мкГр/год;  
 Янівський затон – 6–12 мкГр/год;  
 р. Прип'ять – 0,5–0,7 мкГр/год;  
 р. Уж – 0,3–0,5 мкГр/год;  
 контрольні водойми – 0,03–0,04 мкГр/год.

Середні значення потужності дози внутрішнього опромінювання молюсків зони відчуження, які зумовлені інкорпорацією в тканинах радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  і трансуранових елементів (ТУЕ), реєстрували від 0,05 мкГр/год в р. Прип'яті до 46,0 мкГр/год в оз. Глибоке.

Основним дозоутворюючим радіонуклідом в усіх досліджуваних водоймах є  $^{90}\text{Sr}$ .

У замкнутих водоймах зони відчуження за рахунок цього радіонукліда формується 96–98 % дози внутрішнього опромінювання молюсків. Внесок  $^{137}\text{Cs}$  тут становить 1–3 %, а ТУЕ – до 1 %.

У водоймах-охолоджувачах ЧАЕС і річках зони відчуження внесок  $^{90}\text{Sr}$  в дозу внутрішнього опромінювання дещо менший – 80–90 %, а частка  $^{137}\text{Cs}$  і ТУЕ становить відповідно 7–15 і 5–6 %. Таке співвідношення зумовлене в першу чергу порівняно високим вмістом  $^{137}\text{Cs}$  щодо  $^{90}\text{Sr}$  у воді, а також її катіонним складом, що визначає нижчу інтенсивність концентрування  $^{90}\text{Sr}$ .

Виконані цитогенетичні дослідження в тканинах ембріонів ставковика звичайного свідчать про підвищений рівень аберацій хромосом у безхребетних замкнутих водойм зони відчуження (оз. Азбучин, оз. Далеке-1, оз. Глибоке та Янівський затон) порівняно з

молюсками озер Києва (Голосіївське, Опечінь, Вирлиця) з фоновим рівнем радіонуклідного забруднення.

За період досліджень найбільші значення зареєстровані для безхребетних оз. Глибоке, в клітинах яких частота аберацій в 2001 р. досягала 27 %, що більш ніж у 10 разів перевищує рівень спонтанного мутагенезу для водних організмів.

Середні значення для молюсків із найбільш забруднених озер зони відчуження становили близько 23, 21, 20, 18 % відповідно для оз. Азбучин, оз. Далеке-1, оз. Глибоке та Янівського затону.

Ембріони молюсків в р. Уж і р. Прип'ять характеризувалися невисоким середнім рівнем аберацій клітин – відповідно 2,5 і 3,5 %.

Для молюсків контрольних озер цей показник дорівнював у середньому близько 1,5 %, з максимальними значеннями до 2,3 % (рис. 3).

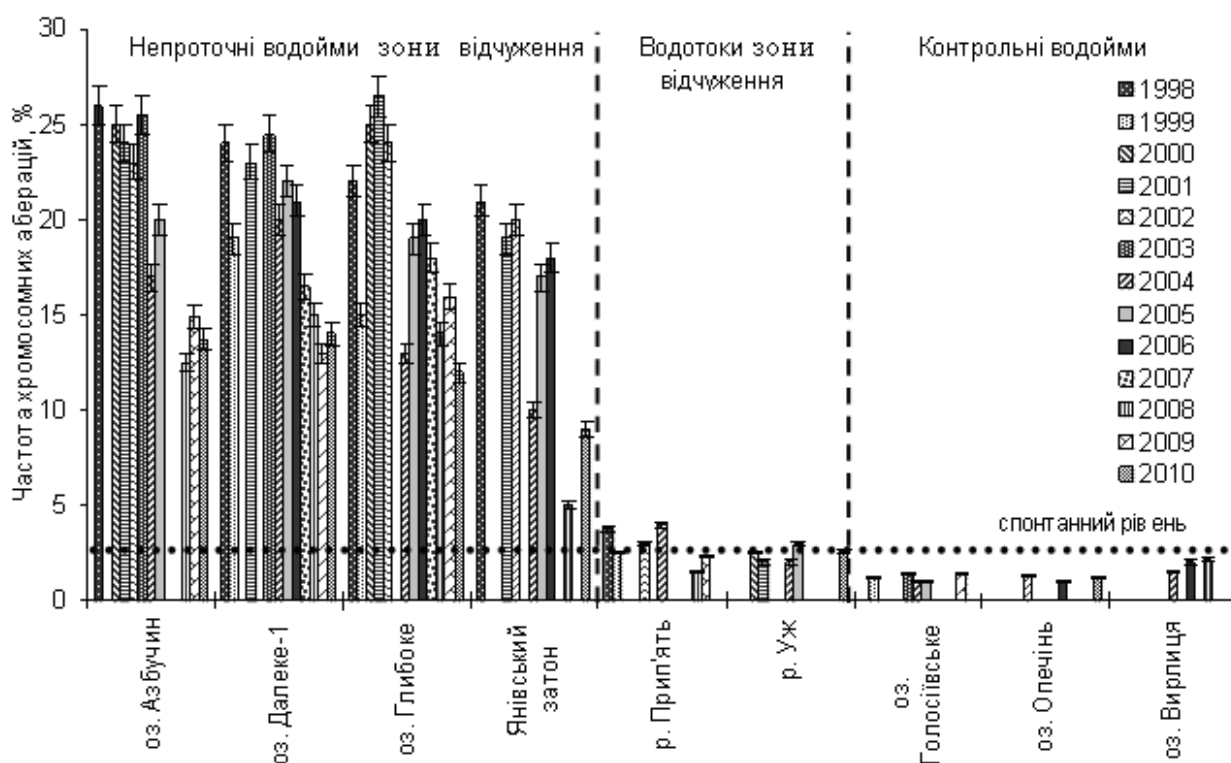


Рис. 3. Середня частота хромосомних аберацій у ембріонів ставковика звичайного у водоймах зони відчуження і озерах Києва протягом 1998–2010 рр.

Упродовж 1998–2010 рр. відмічена тенденція зниження частоти хромосомних аберацій в ембріонах ставковиків, відібраних у замкнутих водоймах зони відчуження.

Аналіз наявних даних дозволив отримати прогнозні оцінки зниження частоти хромосомних аберацій у молюсків досліджуваних водойм до спонтанного рівня (2,0–2,5 %) [7], який притаманний водним організмам в умовах природного радіаційного фону.

В озерах, що розташовані на території лівобережної заплави р. Прип'яті (оз. Глибоке і оз. Далеке-1), найбільш забрудненої радіонуклідами, спонтанний рівень частоти хромосомних аберацій може бути досягнутий у 60–70-х рр., а в Янівському затоні і оз. Азбучин – у 20–30-х рр. ХХІ ст. [8].

Відмічена позитивна кореляція між частотою хромосомних аберацій і потужністю поглиненої дози опромінення в ембріонів ставковика звичайного у водоймах зони відчуження.

Дозова залежність кількості абераційних клітин в ембріональних тканинах молюсків найбільш відповідає ступеневій функції (рис. 4).

Порівняльний аналіз складу формених елементів гемолімфи ставковика звичайного показав, що в молюсків із водойм зони відчуження

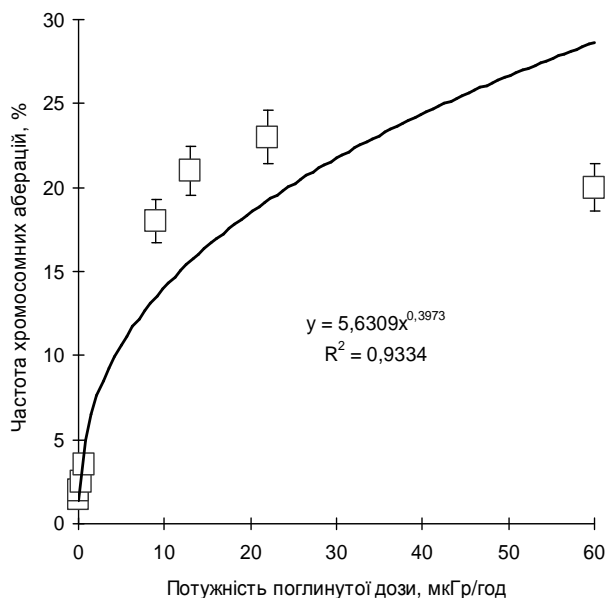


Рис. 4. Залежність кількості абераційних клітин в ембріональних тканинах ставковика звичайного від потужності поглинутої дози опромінення

(оз. Глибоке, оз. Далеке-1, оз. Азбучин і Янівський затон) частка мертвих агранулоцитів становить 43,8 %, а кількість фагоцитів – 45,0 % (рис. 5).

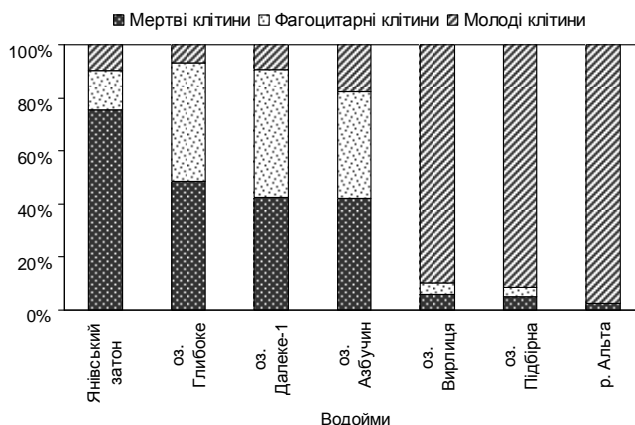


Рис. 5. Склад формених елементів мантийної рідини ставковика звичайного у водоймах у 2007–2008 рр.

Аналогічні показники у молюсків водних об'єктів із фоновим рівнем радіонуклідного забруднення (оз. Вирлиця, оз. Підбірна і р. Альта) були значно нижчі і становлять відповідно в середньому близько 5,3 і 4,2 %.

Кількість молодих амебоцитів у молюсків зони відчуження була навпаки невисокою – до 20 %, тоді як у молюсків із контрольних водойм досягала 89,6 %. Загалом, аналіз формених елементів мантийної рідини досліджених ставковиків, свідчить про істотну зміну складу гемолімфи молюсків із найбільш забруднених озер Зони відчуження.

## Висновки

Кількісні параметри та співвідношення питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  у прісноводних молюсків зони відчуження визначаються переважно рівнем вмісту радіонуклідів, а також концентрацією основних катіонів – їх хімічних аналогів у воді місць проживання безхребетних. Найбільші значення питомої активності радіонуклідів зареєстровані в замкнутих заплавах водоймах, а найменші – в річкових екосистемах.

Серед досліджених видів найбільшими  $K_k$  радіонуклідів характеризуються двостулкові молюски – перлівниця звичайна і дрейсени.

Видоспецифічність накопичення  $^{90}\text{Sr}$  і ТУЕ моллюсками зумовлена переважно пито- мим внеском черепашки в загальну вагу мо- люска.

Величина  $K_k$   $^{137}\text{Cs}$  значною мірою зале- жить від видових еколого-біологічних особ- ливостей і, зокрема, від типу живлення без- хребетних.

Середні значення  $K_k$  досліджуваних ра- діонуклідів для представників червоногих і двостулкових моллюсків зони відчуження розташовані в ряді зменшення.

Потужність поглиненої дози опроміню- вання для червоногих моллюсків при прожи- ванні в приповерхневому шарі літоралі і субліторалі водойм зони відчуження впро- довж 2000–2010 рр. реєстрували в діапазоні 0,3–85,0 мкГр/ч. Максимальні рівні відмічені для озер одамбованої ділянки лівобережної заплави р. Прип'яті – оз. Глибоке і оз. Дале- ке-1, мінімальні – для проточних водних об'єктів – р. Уж і р. Прип'яті.

Основним дозоутворюючим радіонуклі- дом для прісноводних моллюсків зони відчу- ження є  $^{90}\text{Sr}$ , на долю якого припадає до 95–98 % внутрішньої дози опромінювання.

Цитогенетичні і гематологічні досліджен- ня ставковика звичайного в зоні відчуження свідчать про високий рівень аберацій хромо- сом в ембріональних тканинах, а також про істотні зміни складу гемолімфи дорослих особин моллюсків у найбільш забруднених радіонуклідами водних об'єктах. Частота аберації хромосом у тканинах моллюсків, що мешкають у замкнутих водоймах зони від- чуження, набагато разів перевищує рівень спонтанного мутагенезу для водних організ- мів і може бути проявом радіаційно- індукованої генетичної нестабільності.

Ставковик звичайний є широко розповсю- дженим видом у водоймах різних типів, а також достатньо радіочутливим і зручним об'єктом при виконанні цитогенетичного і гематологіч- ного моніторингу водних екосистем, що зазна- ють впливу підприємств ядерного паливного циклу. Цей вид може бути використаний як один із представницьких (референтних) видів гідробіонтів при розробці положень охорони

навколишнього середовища від іонізуючого випромінювання з використанням заснованого на біоті стандарту.

### Література

1. *Функционально-экологические и возраст- ные закономерности концентрирования ра- дионуклидов пресноводными моллюсками зоны отчуждения Чернобыльской АЭС* / Д.И. Гудков, В.В. Деревец, М.И. Кузьменко, А.Б. Назаров // Радиационная биология. Радио- экология. – 2001. – Т. 41, № 3. – С. 326–330.
2. *Радіоекологічні проблеми перезволожу- вання та заболочування одамбованої терито- рії Красненської заплави в зоні відчуження* / Д.І. Гудков, С.І. Кіреєв, С.М. Обрізан та ін. // Бюл. екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселен- ня. – 2005. – № 2. – С. 3–7.
3. *Іванов Ю.О.* Динамика перераспреде- ления радионуклидов в грунтах и растительно- сти / Ю.О. Иванов // Чернобыль – зона отчу- ждения / под ред. В.Г. Барьяхтара. – К.: Нау- кова думка, 2001. – С. 47–76.
4. *Кашпаров В.О.* Загрязнение  $^{90}\text{Sr}$  терри- тории зоны отчуждения / В.О. Кашпаров // Бюл. экологического состояния зоны отчу- ждения и зоны безусловного (обязательного) отселения. – 1998. – № 12. – С. 41–43.
5. *Геохимия техногенных радионуклидов* / Э.В. Соботович, Г.Н. Бондаренко, Л.В. Кононе- нко и др.. – К.: Наукова думка, 2002. – 332 с.
6. *Gudkov, D.I.; Kuzmenko, M.I.; Kireev, S.I. et al.* 2006. Radionuclides in components of aquatic ecosystems of the Chernobyl accident restriction zone / 20 Years after the Chernobyl Accident: Past, Present and Future. – E.B. Burlakova, V.I. Naidich (Eds.). New York: Nova Science Publishers. Inc: P. 265–285.
7. *Tsytsugina, V.G.* 1998. An indicator of radiation effects in natural populations of aquatic organisms. – Radiat. Protect. Dosim. 75 (1–4): P. 171–173.
8. *Радіоекологіческие исследования пресно- водных моллюсков в Чернобыльской зоне от- чуждения* / Д.И. Гудков, А.Б. Назаров, Е.В. Дзю- бенко та ін. // Радиационная биология. Радиоэ- кология. – 2009. – Т. 49, № 6 – С. 703–713.